

Оверхаузеровский четырёхканальный 3D градиентометр и его применение для сканирования подводного газопровода

Е.Д. Нархов, А.А. Широков, А.В. Сергеев, А.Л. Фёдоров, Д.Н. Миллюков (ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина, МИП «КМПТ»), В.А. Сапунов, А.Ю. Денисов, С.Е. Киселёв, В.В. Савельев (ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина, НИЛ КМ), Л.А. Муравьёв (Институт геофизики УрО РАН), А.Н. Иваненко (ФГБУ «Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН»)

Введение

Вопросы освоения Арктических запасов углеводородов являются стратегическими и поэтому приоритетными в государственной политике. По мере развития работ на арктическом шельфе следует ожидать увеличения количества магистральных трубопроводов (МТ). Эксплуатация подводных МТ имеет определенную специфику, поскольку надежность и безопасность таких МТ должна обеспечиваться по повышенным требованиям. Это вызвано особыми условиями, как-то: агрессивная морская среда, подверженность воздействию морского волнения, течений, заглупление в грунты, физические характеристики которых изменяются в течение периода эксплуатации. Кроме того, в арктических условиях существуют трудности при реализации стандартного регламента мониторинга, обслуживания и ремонта, связанные с длительным ледовым периодом. Для обеспечения безопасной эксплуатации подводных МТ необходимы надежные средства мониторинга состояния таких объектов, позволяющие в условиях Арктического шельфа эффективно проводить дистанционные мониторинговые обследования. Поэтому особое значение приобретает развитие технологий дистанционного мониторинга положения подводных заглупленных трубопроводов на основе геофизических методов, в частности, геомагнитного.

Метод магнитной съемки широко распространен в геофизических исследованиях и является одним из основных на этапе инженерно-исследовательских работ при проектировании и строительстве подводных объектов. Магнитная съемка незаменима при поиске промышленного мусора, представляющего опасность при проведении подводных работ (Semevsky et al., 2002; Gorodnitsky et al., 2004). Среди применений многоканальной магнитометрической системы можно выделить использование её при решении поисковых задач (Pozza and Hrvoic, 2011), когда требования по точности определения параметров источников магнитных аномалий существенно ниже, чем при мониторинге. В настоящей статье описывается методика и технология использования магнитной съемки для мониторинга пространственного положения ниток, заглупленных МТ методом многоканальной полноградиентной магнитной съемки. В качестве технологического решения поставленной задачи предлагается использовать полноградиентную многоканальную магнитометрическую систему оверхаузеровских магнитометров SeaPOS, совмещенных с приемником высокоточной дифференциальной навигационной системы. Такая конфигурация позволяет с высокой точностью определять в пространстве положение локальных магнитных аномалий, создаваемых заглупленными трубопроводами, и избавляет от необходимости учета временной составляющей магнитного поля Земли за счет работы с пространственными градиентами поля. Предложены и реализованы алгоритмы обработки многоканальных данных с целью решения задачи высокоточного картирования локальных магнитных аномалий и их градиентов, а также способы решения обратной задачи магнитометрии по этим данным. Во время морских работ 2015 и 2016 годов был испытан прототип полноградиентной магнитометрической системы оверхаузеровских магнитометров, получены карты магнитных аномалий на подводном участке газопровода Бованенково-Ухта в Байдарацкой губе. Полученные данные о характере этих аномалий способствовали изучению специфики проявления МТ в магнитном поле и, соответственно, послужили основой для разработки вычислительных схем и алгоритмов, направленных на оценку положения в пространстве этих объектов.

Полноградцентная система оверхаузовских магнитомеров

Для выполнения магнитомерической съемки использована полноградцентная многоканальная магнитомерическая система SeaPOS разработки УрФУ, представляющая из себя немагнитный каркас, жестко закрепленный на немагнитном плавучем буксируемом носителе. Система SeaPOS состоит из двух абсолютных оверхаузовских магнитомеров-градцентомеров MMPOS-2, датчики которых расположены в вершинах треугольной пирамиды. На носителе расположена приемная антенна JavadGrAntG3T высокоточной навигационной системы JavadSigma, работавшей в режиме кинематики реального времени (RTK) и радиоантенна дифференциальных поправок. (рисунок 1). Регистрация данных производилась на промышленный ноутбук CF-31 с помощью специализированного программного обеспечения MultiPOS. База градцентомеров между 1 и 2 датчиками составляла 100см, между 3 и 4 датчиками – 150см. На рисунке 1 представлены общий вид самой магнитомерической и навигационной системы, закрепленных на носителе.



Рисунок 1. *Общий вид многоканального магнитомерического и навигационного комплекса*

Центральной геометрической точкой системы, к которой приводились все данные, выбрана точка посередине между 3 и 4 датчиком, что связано, в основном, с удобством расчетов и обозначений. Датчики 1, 3 и 4 при синхронной работе обеспечивают измерение двух горизонтальных градиентов, а датчик 2 – вертикального. Очевидно, что для абсолютного измерения всех градиентов необходимы технические решения синхронного измерения с позиционированием системы по углам, относительно осей координат, что не представляет в настоящее время особых затруднений. Ключевой особенностью данной системы является то, что модуль полного вектора градиента магнитного поля инвариантен относительно поворотов осей координат, а использованная конфигурация магнитомерической системы позволяет

измерять его непосредственно в процессе съемки. Это же относится и к вертикальному градиенту и модулю горизонтального градиента при работе в спокойную погоду. Вертикальный градиент, модуль полного («аналитический сигнал») и модуль горизонтального градиентов магнитного поля – важные его производные и самым широким образом используются в современных алгоритмах интерпретации магнитных аномалий (Roest et al., 1992).

Совмещение магнитометрической системы и приемника высокоточной навигационной системы, работающей в режиме кинематики реального времени (РТК), позволяет решить главную методическую проблему морской магнитной съемки – обеспечить необходимую точность позиционирования измерений магнитного поля в динамике. Достигнутые дециметровые точности позиционирования измерений в пространстве и миллисекундные во времени позволяют обеспечить проведение площадных магнитных съемок с погрешностью в доли процента от амплитуды наблюдаемых аномалий.

Работы по определению девиационных погрешностей измерительного комплекса в районе работ потребовали в общей сложности 19 галсов суммарной длиной ~18км с шагом 30° и 45° по азимуту на расстоянии около 1.5 мили от судна. По результатам этих работ установлено, что девиация не превышает 1-1.5 нТл на базу и постоянна в спокойном поле, т.е. убирается простым уравниванием градиентной съемки по уровню (Gordin et al., 1986).

Методика съемки и обработки 4-х канальных магнитометрических данных

Основной задачей морской магнитной съемки над МТ является картирование локальных магнитных аномалий, создаваемых этими объектами, и решение по этим аномалиям обратной задачи магнитометрии относительно положения трубопровода в пространстве. Поскольку магнитные аномалии, создаваемые металлическими, как правило – железными объектами, имеют локальный характер, большую амплитуду и правильную форму, они относительно легко идентифицируются и выделяются на фоне аномалий геологической природы. В силу слабой изученности подводных трубопроводов магнитным методом, работы 2015 года были направлены, в основном, на изучение свойств магнитных аномалий над трубопроводом и выработку методических правил и приемов, необходимых для решения задачи мониторинга этих объектов.

Были выполнены работы на нескольких полигонах с разной глубиной с межгалсовым расстоянием до 5м на основных галсах вкрест трубы, что позволило уточнить основные параметры создаваемых трубопроводом аномалий. Для примера приведем результаты съемки на полигоне с глубиной дна 18-19 м. Установлено, что на каждом из основных галсов отчетливо выделяются по четыре локальные аномалии разного знака, соответствующих 4м ниткам газопровода, амплитудой от -400 – до +700 нТл и шириной вдоль профиля ~50 м. Аномалии имеют классическую правильную одномодальную симметричную форму и, как правило, не имеют сопряженных экстремумов. Там, где основания аномалий сливаются, их максимумы совершенно четко разделяются в аналитическом сигнале. Эти аномалии очень хорошо коррелируют между профилями в северо-восточном направлении, четко трассируя в плане положение ниток газопровода (рисунок 2).

Построение карт аномалий магнитного поля (АМП) уже на первом полигоне привело к выводу, что аномалии над трубами носят площадной характер, т.е. не являются линейными, а состоят из цепочек знакопеременных квазиизометричных аномалий. Поэтому для решения поставленной задачи требуется: а) проводить площадную съемку для их картирования и б) решать задачу в 3D варианте. Если выполнять стандартные требования по морской магнитной съемке (Guzevich et al., 1986) и покрывать площадь регулярной сеткой ортогональных галсов для картирования таких аномалий, метод магнитной съемки теряет экономическую целесообразность ввиду большого объема требуемых работ. Однако, как будет показано ниже,

используя преимущества полноградиентной многоканальной магнитометрической системы, можно решать эту задачу с существенно меньшими затратами.

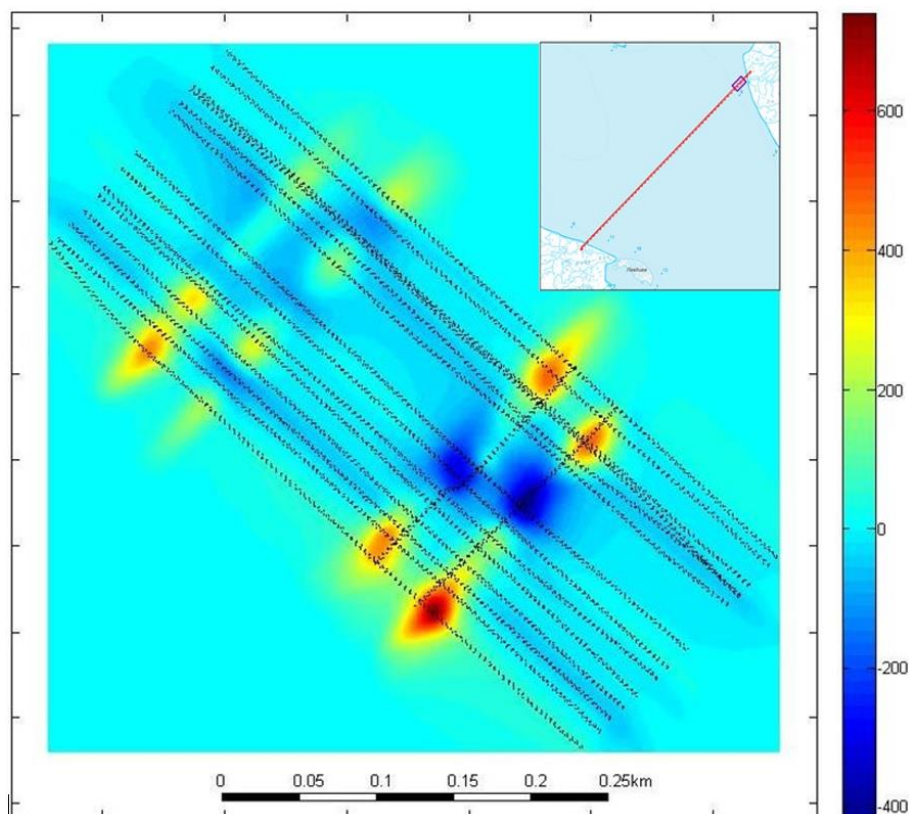


Рисунок 2. Карта локальных аномалий магнитного поля на полигоне у Ямальского берега

Первичная обработка магнитной съемки велась в дифференциальном варианте для каждой пары датчиков, по технологии, разработанной в ИО РАН. Эта технология включает в себя набор методик и программных средств, позволяющих оперативно и качественно преобразовать входной поток исходных магнитных и навигационных данных в пригодный для количественной интерпретации материал (Gorodnitsky et al., 2004; Ivanenko et al., 2012).

Расчет значения поля и градиентов в начале локальной системы координат носителя по 4-х канальным данным ведется по формуле:

$$\begin{pmatrix} F(t) \\ g_x(t) \\ g_y(t) \\ g_z(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ y_1 & y_1 & y_3 & y_4 \\ z_1 & z_2 & z_3 & z_4 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \\ F_3(t) \\ F_4(t) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где $x_1, \dots, x_4, y_1, \dots, z_4$ – координаты датчиков в локальной системе координат носителя (оффсеты), а $F_1(t) \dots F_4(t)$ – временные ряды измеренных значений поля по всем четырем каналам. Аналитический сигнал ($As(t)$) и модуль горизонтального градиента ($H(t)$) являются важными картирующими функциями, отмечающими в плане положение источников аномалий. Они рассчитываются как

$$As(t) = \sqrt{g_x(t)^2 + g_y(t)^2 + g_z(t)^2}, \quad (2)$$

$$H(t) = \sqrt{g_x(t)^2 + g_y(t)^2}. \quad (3)$$

Первый инвариантен относительно любых поворотов системы координат носителя, второй – относительно вращений в горизонтальной плоскости. Поэтому, можно рассчитывать их сразу

по формулам (2) и (3), последняя верна при отсутствии бортовой или килевой качки носителя, т.е. при работе в штилевую погоду. Поскольку $As(t)$ и $H(t)$ - тоже временные ряды и рассчитываются по 4-х канальным измерениям магнитного поля до геодезической привязки измерений, можно в дальнейшем называть их «измеренными». Преимущество многоканальной полноградиентной системы состоит в том, что для расчета карты, например, аналитического сигнала нет необходимости выполнять площадные трансформации (2D преобразование Гильберта в случае вертикального градиента (Roest et al., 1992) как при работе с одноканальными данными.

После отчистки данных с каждого канала от случайных сбоев (выбросов), для них рассчитываются истинные геодезические координаты на момент измерений, в результате чего данные приобретают пространственную привязку. Рассчитанные по ним градиенты обозначим $g_x(\vec{r}), g_y(\vec{r}), g_z(\vec{r})$, а аналитический сигнал и модуль горизонтального градиента - $As(\vec{r})$ и $H(\vec{r})$.

Градиенты поля $g_x(\vec{r}), g_y(\vec{r}), g_z(\vec{r})$ и трансформанты поля $As(\vec{r})$ и $H(\vec{r})$ позволяют перейти поэтапно к задаче локализации и точного определения положения источников аномалий, в нашем случае - намагниченных участков трубопровода, создающих такие аномалии.

Для них выполняется процедура разделения аномалий на локальные и региональные геологической природы. Вся съемка разбита на прямолинейные отрезки (профили), для каждого цикла измерений рассчитан набор из трех ортогональных градиентов модуля вектора магнитной индукции в подвижной системе координат носителя. Эти данные являются основой для последующего расчета и картирования модуля полного градиента вектора АМП («аналитического сигнала») и модуля горизонтального градиента. Разделение и локализация в пространстве аномалий от разных источников позволяет перейти к применению устойчивых алгоритмов решения обратной задачи. Пример обработанных данных полученных на полигоне с глубиной 19м представлены на рисунках 3 и 4. СКО съемки для измеренного аналитического сигнала после удаления из градиентов регионального фона и увязки составила $\sim 0,5\%$. СКО съемки по АМП – $0,2\%$.

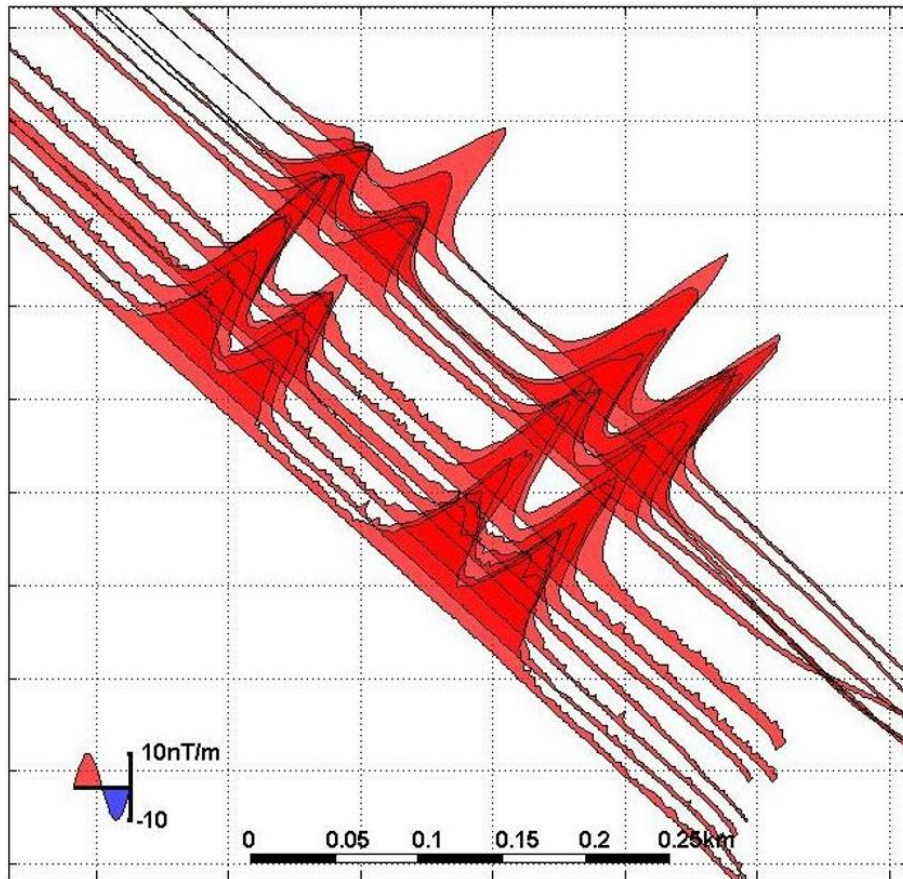


Рисунок 3. Карта-схема графиков $As(\vec{r})$ на полигоне

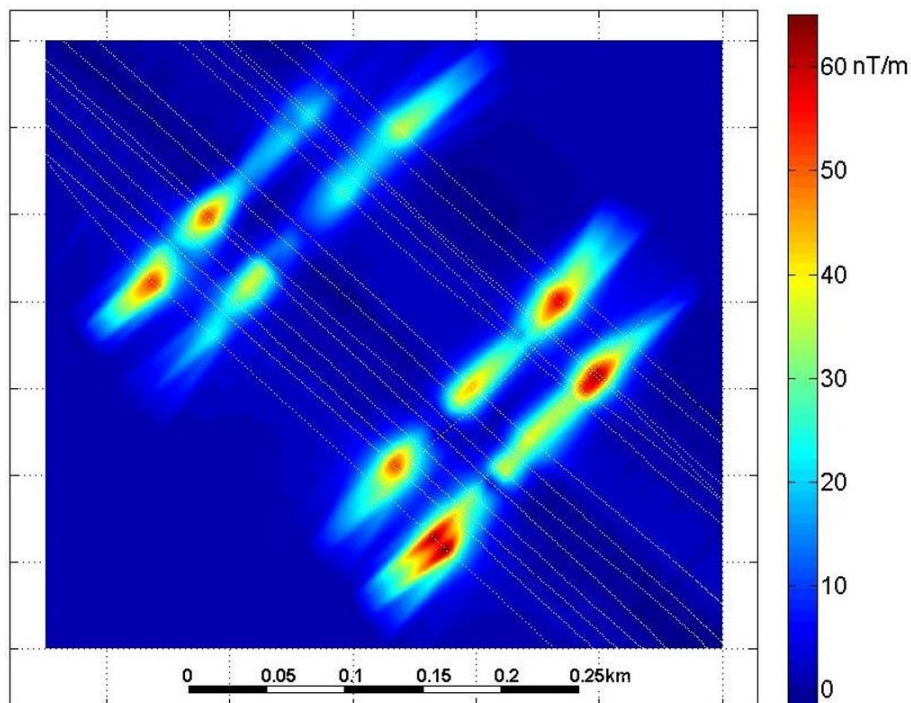


Рисунок 4. Карта-схема географически привязанного и усредненного аналитического сигнала $As(\vec{r})$ на полигоне. Светлые точки – маршрут движения центра 4х-датчиковой магнитометрической и навигационной системы

Поскольку общее количество аномалий над трубопроводом оценивается величиной до 600 на каждую нитку, возникает крайняя необходимость разработки автоматизированного алгоритма для проведения массовых расчетов по всем аномалиям. Как первый шаг в этом направлении разработана процедура автоматического выделения аномалий в аналитическом сигнале и оконтуривания в пространственной области облака аномальных точек, используемых для решения обратной задачи. Разработан и опробован специальный алгоритм для автоматического определения положения источников локальных магнитных аномалий по данным полноградиентной съемки. Построена устойчивая схема определения геометрических и амплитудных параметров источников аномалий для произвольно расположенных точек наблюдений, в том числе сосредоточенных на нерегулярной системе профилей. Результаты применения разработанных методик приводятся в следующем разделе.

Разработанный алгоритм позволяет локализовать в пространстве и времени облако точек, приуроченных к локальной аномалии аналитического сигнала. Для такой локальной аномалии удастся хорошо подобрать эквивалентный по полю элементарный источник – монополь или диполь. В случае занимающего большой объем объекта эта модель отражает лишь самые общие его свойства – положение верхней кромки (модель монополя) или центра магнитных масс (диполь), однако, учитывая относительно малые размеры поперечного сечения трубопровода относительно глубины моря в Байдарацкой губе и обратный к кубическому закон затухания магнитных аномалий с расстоянием, допускается адекватность моделей точечных источников. Проведенные в 2015 году расчеты по характерным аномалиям и сравнение этих результатов с данными сейсмоакустики показали правильность такого подхода.

Реализованная для решения 3D задачи по профильным данным технология, сводится к нахождению эквивалентной модели, наилучшим образом отвечающей измеренным градиентам. На данном этапе ограничились подбором источника по аналитическому сигналу, поскольку он инвариантен относительно любых поворотов локальной системы координат носителя. Для уверенного использования измеренного вектора градиента поля, особенно в неспокойную погоду, необходимы дополнительные технические решения, а именно – синхронная с измерениями магнитного поля и координат регистрация углов крена и тангажа с помощью инклинометров (угол рыскания достаточно надежно определяется с помощью высокоточной GPS системы и незначителен при длинном буксировочном кабеле). Реализация данного подхода позволила бы вплотную подойти к решению задачи определения положения источников аномалий в реальном времени.

Выделение локальных аномалий в аналитическом сигнале дает хорошие начальные приближения для оценок геометрических параметров источника. Так, пересечения ортогоналей к профилям в точках локальных максимумов $As(\vec{r})$ образуют облако точек, близких в плане к центру источника. Эквивалентный радиус площади фигуры, вмещающей отрезки квантилей локальных аномалий $As(\vec{r})$, принадлежащих одному кластеру, близок к глубине этого источника. Для подбора источника используется параметрическая нелинейная оптимизация (нелинейный метод наименьших квадратов с ограничениями-неравенствами). Параметрами, подлежащими оптимизации, являются координаты и тип источника и его магнитный момент (мощность). Ограничения задаются исходя из реальных условий съемки (глубина до дна известна, известна также предельная глубина траншеи, горизонтальное отклонение также ограничено). Минимизация подвергается невязка между модельным и измеренным аналитическим сигналом. Таким образом, итерационный процесс нелинейной оптимизации стартует вблизи точки оптимума и быстро сходится.

Параллельно с нелинейной задачей оптимизации решается линейная – с помощью деконволюции Эйлера (Reid et al., 1990). Поскольку в решении участвуют абсолютные градиенты поля, для ее корректного использования необходима точная мгновенная привязка локальной системы координат носителя к глобальной, что пока не реализовано в испытанном нами комплексе. Определение координат источника по способу Эйлера, когда используется вектор градиента, особенно при недостатке ортогональных галсов внутри локального облака

точек, остается чуть ли не единственным реальным способом фиксировать источники аномалий сбоку от профиля. Поэтому реализован и этот способ в ограниченном варианте без учета покачивания системы в процессе съемки, для увеличения гибкости и устойчивости алгоритма решения обратной задачи.

Результаты исследований

В качестве примера использования разработанного аппаратно-программного комплекса приведем результаты исследований в центральной части акватории Байдарацкой губы. На рисунке 5 приведена карта АМП на выделенной площади, характерный профиль вдоль 2-й нитки трубопровода и небольшой выделенный участок с характерной аномалией (аномалия №29).

На фрагменте отчетливо виден локальный характер аномалии, а также все три траектории движения нижних датчиков системы, по которым и строилась карта. На профиле отмечается четкий периодический характер аномалий с длиной волны ~ 160 м, такая же картина наблюдается на карте АМП.

На рисунке 6 показано как выглядят карта, ее фрагмент и характерный профиль в аналитическом сигнале. Сохраняется локальный характер аномалии 29, однако на профиле и на карте картина существенно сложнее, аномалии менее регулярные и более высокочастотные.

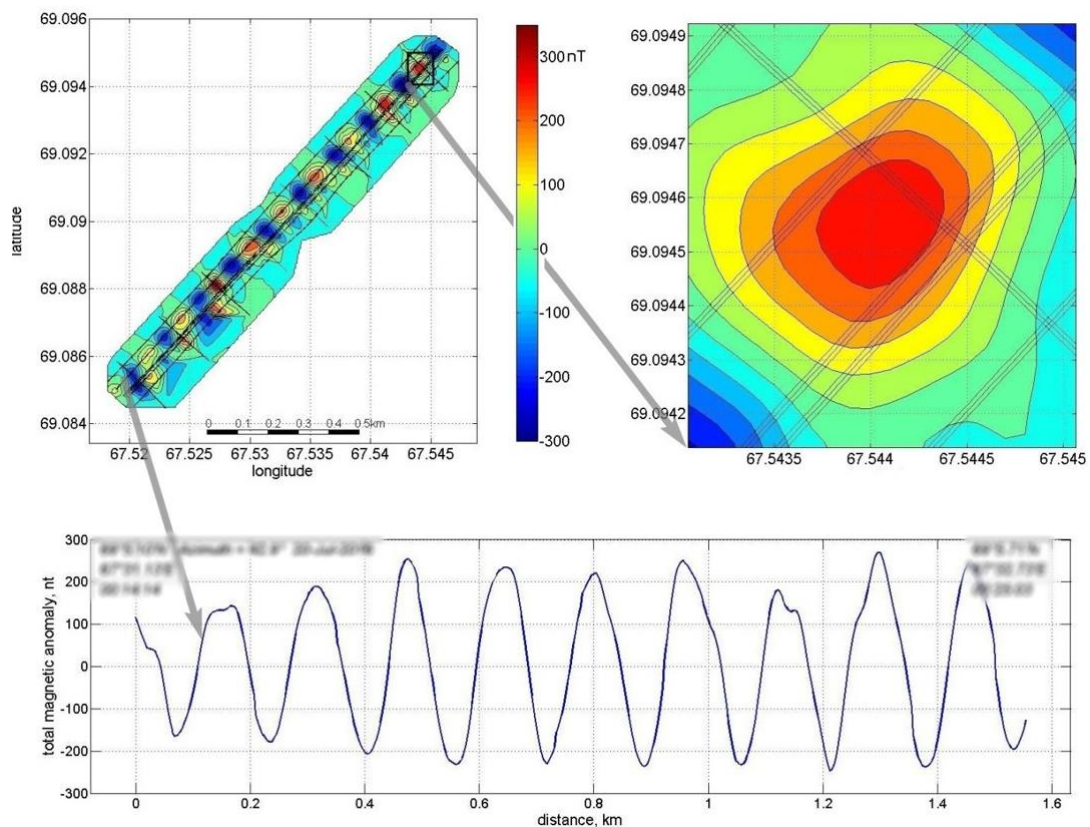


Рисунок 5. Карта-схема АМП глубокой части трассы, ее фрагмент (аномалия 29) и характерный профиль над 2-й ниткой трубопровода

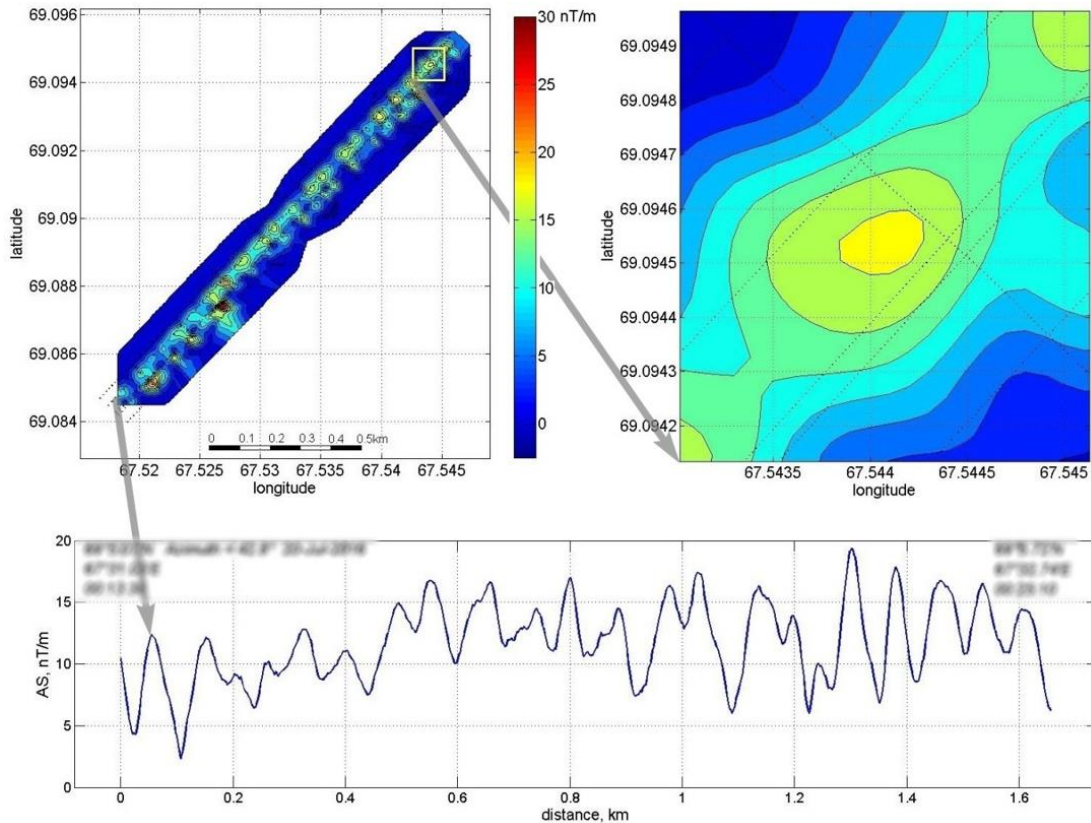


Рисунок 6. Карта-схема аналитического сигнала глубокой части трассы, ее фрагмент (аномалия 29) и характерный профиль над 2-й ниткой трубопровода

Следующий рисунок 7 иллюстрирует процесс определения положения источника аномалии способом нелинейной инверсии 3D аналитического сигнала. Вначале, для аномалии 29 в аналитическом сигнале выбирается область значений, превышающих заданный порог ($1/3$ от амплитуды локального максимума). Для выделенного облака точек измерений аналитического сигнала решается методом нелинейной оптимизации параметрическая задача на поиск наилучшего набора параметров источника (его координат и мощности), минимизирующего норму невязки между измеренным и модельным сигналом. Тип источника выбирается по характерным особенностям аномалий над ним, обычно аномалии над трубопроводом имеют четкие локальные экстремумы без сопряженных экстремумов противоположного знака. Трехмерный монополь хорошо воспроизводит аномалии подобного типа, а если у аномалии наблюдаются сопряженные, противоположные по знаку, и меньшей амплитуды ветви по бокам, то в качестве модельного объекта предпочтительнее выбрать диполь.

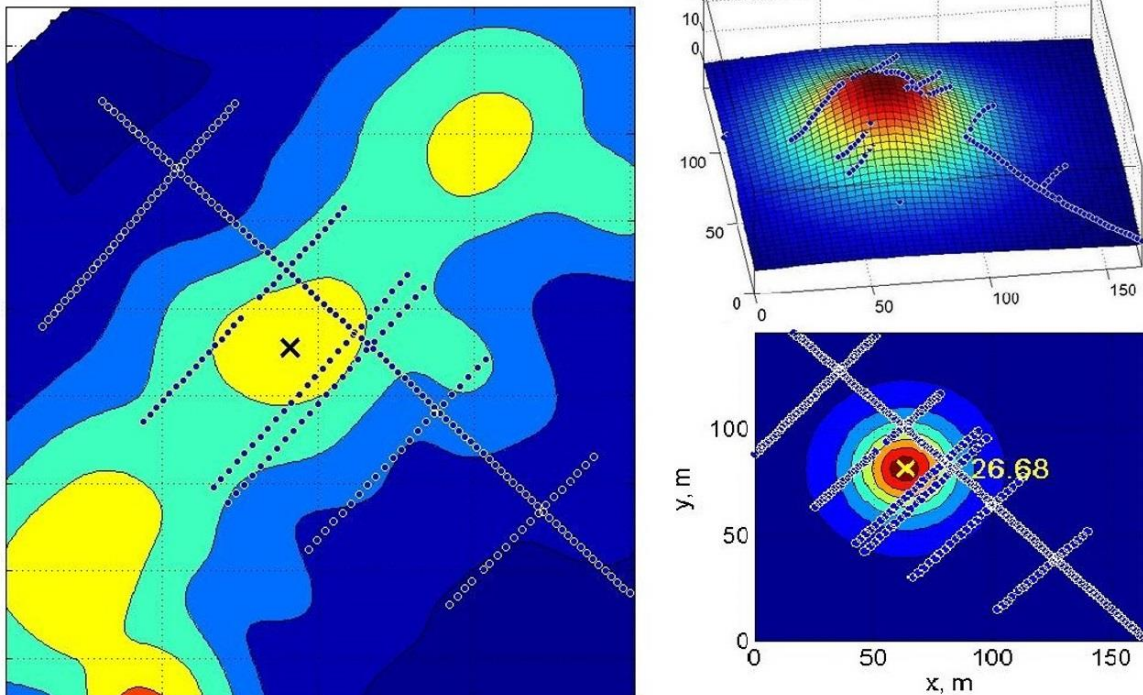


Рисунок 7. Пример подбора параметров модельного источника, аналитический сигнал от которого наилучшим образом соответствует измеренному для аномалии 29

СКО определения координат подобранных модельных источников выявленных аномалий варьируется от 0.15–0.2 до 1–1.2 м по всем пространственным координатам и в значительной степени зависит от расположения и густоты съемочных галсов в районе источника. Следует отметить, что работы на данном участке носили ограниченный характер по объективным причинам (неблагоприятные погодные условия) и выполненных промерных галсов (вдоль трубопровода) недостаточно для надежного картирования аномалий АМП и его градиентов.

Заключение

В результате проведенных в 2015 и 2016 гг работ была испытана полноградиентная многоканальная магнитометрическая система SeaPOS, совмещенная с высокоточной навигационной системы. Система предназначена для высокоточного картирования магнитных аномалий и их градиентов в морских условиях для небольших глубин.

По результатам картирования магнитных аномалий над трубопроводом установлено, что эти аномалии очень однородны в плане типа источника и хорошо аппроксимируются узким классом модельных тел. Такой характер эквивалентных источников для сегментов трубы указывает на весьма простую природу ее намагниченности - она носит преимущественно остаточный характер, и аномалии создаются на концах (стыках) отдельных труб, которые выступают в качестве элементарных полюсов или магнитов.

Использование полноградиентной, жестко скрепленной между собой и приемником GPS магнитометрической системы показало себя в качестве перспективного прототипа для магнитометрического измерительного комплекса, предназначенного для высокоточного 3D мониторинга положения трубопровода. С помощью такой системы и имеющегося набора методико-программных средств можно надежно картировать, идентифицировать и интерпретировать создаваемые сегментами труб аномалии, решая задачу определения пространственного положения трубопровода с необходимой точностью.

Таким образом, магнитометрический метод может качественно дополнить другие геофизические способы точного определения положения подводных трубопроводов. Особенно ценным является то, что разрабатываемая технология позволяет решать эту задачу экономично, без густой сети промерных галсов поперек трубопровода - достаточно нескольких профилей вдоль его ниток с межгалсовым расстоянием в несколько метров.

References

Gordin, V.M., Rose, E.N. and Uglov, B.D. [1986] Marine Magnetometry. Nedra, Moscow. [in Russian]

Gorodnitsky, A.M., Filin, A.M. and Malyutin Yu.D. [2004] Marine Magnetic Gradient Shooting. VNIRO, Moscow. [in Russian]

Guzevich, S.N., Demin, B.N., Kulagina, T.M., Mishchenko, V.D. and Stavrov, K.G. [1986] Instructions for marine magnetic survey (IM-86). Publisher of the Main Directorate of Navigation and Oceanography of the USSR Ministry of Defense, Leningrad. [in Russian]

Ivanenko, A.N., Brusilovsky, Yu.V., Filin, A.M. and Shishkin, N.A. [2012] Modern technologies of processing and interpretation of magnetic data in the search for oil and gas in the waters. Geophysics, 3, 60–70. [in Russian]

Pozza, M. and Hrvoic, D. [2011] Mapping marine ferrous targets using the SeaQuest gradiometer system, rev 1.3. Marine Magnetics Corp.

Reid, A. B., Allsop, J. M., Granser, H., Millett, A. J. and Somerton, I. W., [1990] Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. Geophysics, 55(1), 80–91.

Roest, W. R., Verhoef, J. and Pilkington, M., [1992] Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. Geophysics, 57, 116–125.

Semevsky, R. B., Averkiev, V.V. and Yarotsky, V.A. [2002] Special Magnetometry, Nauka, St. Petersburg. [in Russian]